



DOI 10.32782/2078-0877-2025-25-1-4

УДК 631.312

В. Т. Надикто, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1770-8297

Г. А. Петров, аспірант

ORCID: 0000-0002-1726-2731

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРОВАНOSTІ РУХУ ОРНОГО МТА З ФРОНТАЛЬНИМ ПЛУГОМ БЕЗ ОПОРНОГО КОЛЕСА

Анотація. Сучасне аграрне виробництво характеризується використанням орних агрегатів за схемою push-pull. Її особливістю є використання фронтального плуга. Зазвичай таке орне знаряддя використовують з опорним колесом. Дослідження розглядає процес аналізу стійкості руху орного агрегату з фронтальним плугом з опорним колесом (варіант 1) порівняно з варіантом без нього (варіант 2). Дослідженнями установлено при застосуванні агрегату за варіантом 2 спектр коливань кута повороту керованих коліс трактора є бажано вужчим за спектр коливань цього ж параметра для агрегату з фронтальним плугом, обладнаним опорним колесом. Спектр коливань курсового кута трактора вужчий, ніж спектр коливань кута повороту його керованих коліс. В орного агрегату за варіантом 2, як у динамічній системі, має місце позитивний кореляційний зв'язок між входом (керувальним впливом) і виходом. Максимальне значення цього зв'язку сягає позначки 0,9. А це у 1,8 раза більше порівняно з орним агрегатом за варіантом 1. Практично це означає, що застосування фронтального плуга без опорного колеса забезпечує більш тісний кореляційний зв'язок між кутом повороту керованих коліс трактора і його курсовим кутом. У практичному сенсі це вказує на задовільну керованість руху орного МТА за новою схемою.

Ключові слова: трактор, керовані колеса, курсовий кут, спектральна щільність, взаємна кореляційна функція

Постановка проблеми. Оранка була й залишається найбільш енергоємною технологічною операцією, оскільки на її здійснення, як засвідчують результати досліджень [1], витрачається щонайменше 40 % енергії. Зазвичай оранка проводиться традиційними задньонавісними (інколи причіпними) плугами. Водночас останнім часом дедалі більшою популярністю користуються орні машинно-тракторні агрегати (далі – МТА) за схемою push-pull, тобто «штовхай-тягни» [2]. Їх конструктивною особливістю є наявність у складі МТА фронтального (передньонавісного) плуга.

Останній, як правило, у своєму складі має опорне колесо, призначене для регулювання глибини обробки ґрунту цим орним знаряддям. Проте дослідження показують [3], що ефективність використання фронтального плуга можна підвищити шляхом видалення з його конструкції опорного колеса. Водночас проблемним залишається питання керованості плоскопаралельного горизонтального руху такого орного МТА.

Аналіз останніх досліджень. Динаміка горизонтального руху орного агрегату за схемою push-pull суттєво залежить від вертикального навантаження, яке припадає на передній міст трактора з керованими колесами. Природу цього процесу частково досліджено в роботах [4; 5]. Стійкість і керованість руху МТА в горизонтальній площині при цьому не розглядаються.

Попри стандартизацію за кордоном параметрів переднього навісного механізму (далі – ПНМ) трактора при роботі з фронтальним плугом [6], дослідники Singh N. і Pandey K. [7] аналізували технологічну природу функціонування такого орного знаряддя без опорного колеса. Проте їх метою було розроблення лише комп'ютерної програми, яка б дала змогу здійснювати розрахунок сил, що діють у центральній та нижніх тягах ПНМ трактора. Водночас автори

взагалі не розглядають механізм обмеження занурення фронтального плуга в ґрунт у процесі його функціонування. Ба більше, дослідники зовсім не аналізують керованість руху розглянутого ними орного агрегату з фронтальним плугом без опорного колеса. Результати досліджень у цьому напрямі майже відсутні в літературних джерелах.

Мета статті – репрезентувати результати досліджень керованості горизонтального руху орного МТА з фронтальним плугом без опорного колеса.

Основна частина. Під керованістю прийнято розглядати реакцію машинно-тракторного агрегату на керувальний вплив [8]. У нашому випадку таким є кут повороту передніх коліс трактора. Відгуком (або реакцією) на цей вплив розглядатимемо курсовий кут трактора, а в підсумку – коливання траєкторії борозни, яка певним чином характеризує коливання ширини захвату орного МТА.

Лабораторно-польові дослідження проводили двома орними машинно-тракторними агрегатами на базі трактора серії ХТЗ-16131. У першому з них фронтальний плуг був налаштований з опорним колесом (варіант 1), а в другому – без нього (варіант 2, рис. 1).



Рис. 1. Орний агрегат з фронтальним плугом без опорного колеса

Для запису курсового кута й кута повороту передніх керованих коліс трактор ХТЗ-16131 був обладнаний вимірювально-реєстраційним комплексом на основі Arduino Uno. Крім власне мікроконтролера, цей комплекс містив необхідні датчики, автономне джерело живлення й пристрій запису оцифрованих сигналів на мікро CD (карту пам'яті). Отримані так дані використовували для розрахунку необхідних статистичних характеристик.

Аналіз отриманих експериментальних даних засвідчує, що при застосуванні фронтального плуга без опорного колеса спектр коливань кута повороту керованих коліс трактора є вужчим за спектр коливань цього ж параметра для агрегату з фронтальним плугом, обладнаним опорним колесом (рис. 2). Так, при налагодженні орного МТА за варіантом 1 частота зрізу нормованої спектральної щільності коливань кута повороту трактора дорівнює $0,7 \text{ с}^{-1}$. Це означає, що найменше 95 % дисперсії коливань цього параметра зосереджена в діапазоні $0 \dots 0,7 \text{ с}^{-1}$ або $0 \dots 0,11 \text{ Гц}$.

Натомість при налаштуванні орного агрегату за варіантом 1 ця частота є на 28,6 % меншою і становить $0,5 \text{ с}^{-1}$. Відповідно вужчим є й діапазон, у якому зосереджена основна доля дисперсії коливань кута повороту керованих коліс трактора з фронтальним плугом без опорного колеса.

Якісно характер коливань курсового кута трактора при його функціонуванні в складі обох орних МТА приблизно такий самий, як і в процесі коливань кута повороту керованих коліс енергетичного засобу. У кількісному вираженні ці процеси дещо різні. А саме – при роботі трактора з фронтальним плугом з опорним колесом (варіант 1) спектр дисперсій коливань курсового кута трактора зосереджений у діапазоні частот $0 \dots 0,5 \text{ с}^{-1}$ або $0,08 \text{ Гц}$ (рис. 3).

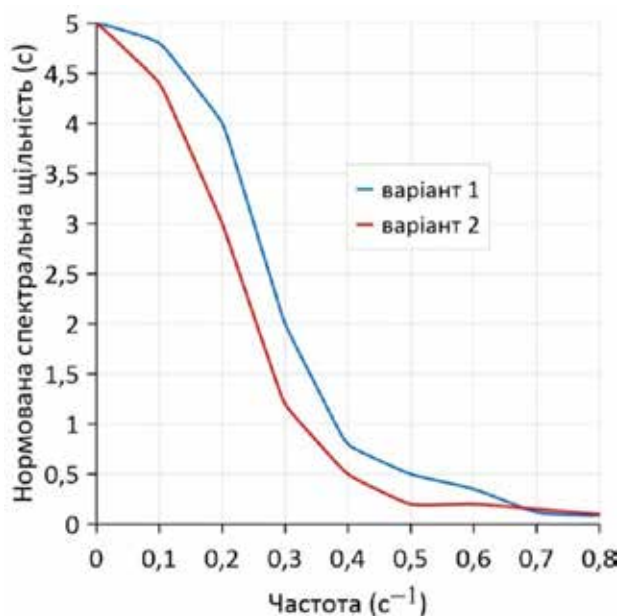


Рис. 2. Нормовані спектральні щільності коливань курсового кута трактора орних МТА

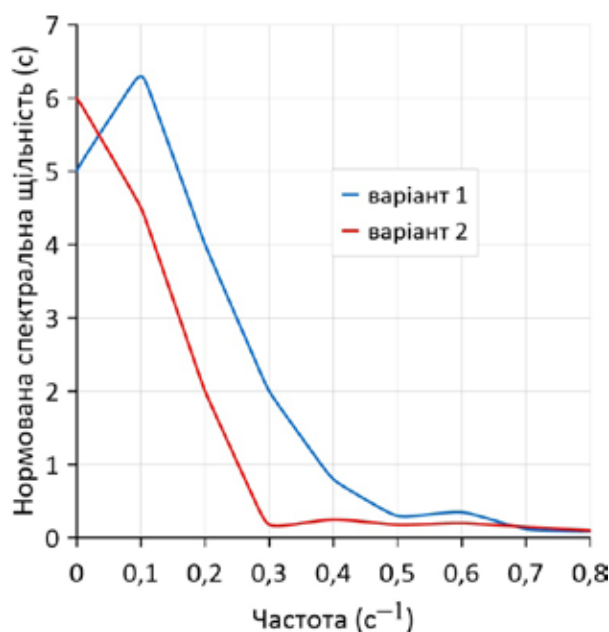


Рис. 3. Нормовані спектральні щільності коливань кута повороту керованих коліс трактора орних МТА

Порівняно з орним агрегатом за варіантом 2 частота зрізу відповідної нормованої спектральної щільності не перевищує позначки 0,3 с⁻¹. Це на 40 % менше. Ба більше, максимум дисперсії коливань курсового кута трактора при його функціонуванні з фронтальним плугом без опорного колеса (варіант 1, рис. 3) припадає на частоту 0,1 с⁻¹. В орного агрегату за варіантом 2 таке має місце за частоти, яка майже наближена до нуля.

Загалом, аналіз рисунків 2 і 3 показує, що спектр коливань курсового кута трактора вужчий, ніж спектр коливань кута повороту його керованих коліс. І такий результат, притаманний обом

варіантам орного машинно-тракторного агрегату, є цілком логічним з огляду на більшу інерційність корпусу енергетичного засобу порівняно з інертністю його керованих коліс.

Оскільки кут повороту керованих коліс трактора є входом, а курсовий кут енергетичного засобу – виходом такої динамічної системи, як орний агрегат, то цікаво знати ступінь кореляції між цими входною і вихідною величинами. Найінформативнішою статистичною характеристикою такого зв'язку є нормована взаємна кореляційна функція [9; 10] (рис. 4).

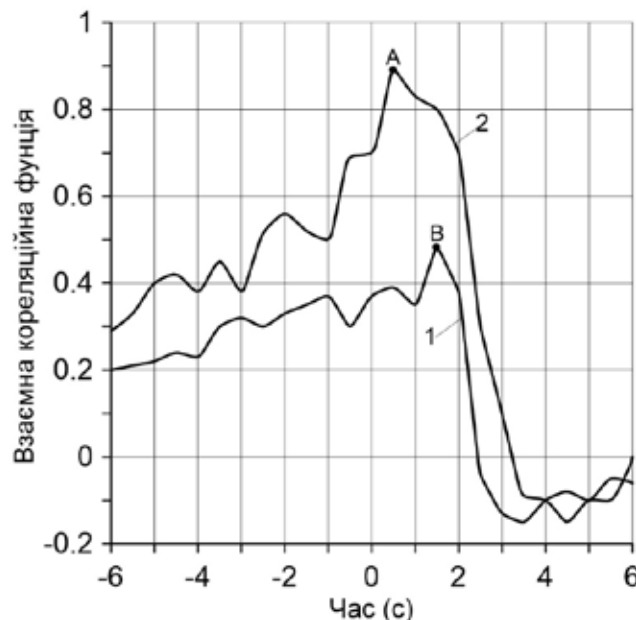


Рис. 4. Нормовані взаємні кореляційні функції коливань курсового кута трактора під впливом коливань кута повороту його керованих коліс для орних агрегатів з фронтальним плугом з опорним колесом (1) і без нього (2)

Її предметний аналіз засвідчує таке. В орного машинно-тракторного агрегату за варіантом 1 максимальне значення нормованої взаємної кореляційної функції становить 0,5 (точка В, крива 1, рис. 4). У зоні максимуму цієї функції має місце позитивний кореляційний зв'язок між кутом повороту керованих коліс трактора і його курсовим кутом. Точка В зміщена вправо від нульової осі (ординати) на 1,2 с. Це вказує на те, що саме на такий час запізнюється реакція трактора (зміна його курсового кута) на керувальний вплив (кут повороту керованих коліс енергетичного засобу). Крім того, зміщення часу запізнення цієї динамічної системи вправо від нульової осі вказує на те, що її входом є кут повороту керованих коліс, а виходом – курсовий кут трактора. Якби таке часове запізнення зміщене вліво від нульової осі, то мав б місце інший протилежний стан динамічної системи. А саме – у такому випадку її входом був би курсовий кут енергетичного засобу, а виходом – кут повороту його керованих коліс.

Водночас в орного агрегату за варіантом 2, як у динамічної системи, має місце теж позитивний кореляційний зв'язок між входом (керувальним впливом) і виходом. Проте максимальне значення цього зв'язку сягає позначки 0,9 (точка А, крива 2, рис. 4). А це у 1,8 раза більше порівняно з орним агрегатом за варіантом 1. Практично таке означає, що застосування фронтального плуга без опорного колеса забезпечує більш тісний кореляційний зв'язок між кутом повороту керованих коліс трактора і його курсовим кутом. Ба більше, налаштування орного МТА за варіантом 2 (тобто без опорного колеса) дає змогу зменшити запізнення реакції трактора на зміну керувального впливу до 0,5 с. Це втричі менше, ніж в орного агрегату з фронтальним плугом, обладнаним таким колесом (див. рис. 4).



У підсумку можна зазначити, що налаштування орного агрегату з фронтальним плугом без опорного колеса дає змогу підвищити керованість руху всього МТА з одночасним зменшенням його запізнення на керувальний вплив у вигляді кута повороту керованих коліс трактора.

У практичному сенсі підвищення керованості руху орного агрегату відобразилося на коливаннях траєкторії борозни після його проходу. Як показав аналіз експериментальних даних, спектр коливань цього параметра в агрегаті з фронтальним плугом без опорного колеса вужчий, ніж в агрегаті з передньоनावісним орним знаряддям, обладнаним опорним колесом.

Так, в агрегаті за варіантом 1 спектр дисперсій коливань траєкторії борозни зосереджений у діапазоні частот $0 \dots 0,7 \text{ м}^{-1}$. За швидкості руху такого машинно-тракторного агрегату $2,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ це $0 \dots 1,54 \text{ с}^{-1}$ або $0 \dots 0,25 \text{ Гц}$.

Натомість в агрегаті за варіантом 2 спектр дисперсій коливань траєкторії сформованої борозни є вужчим і дорівнює $0 \dots 0,6 \text{ м}^{-1}$. За швидкості руху цього агрегату на рівні $2,36 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ цей діапазон становить $0 \dots 1,42 \text{ с}^{-1}$ або $0,22 \text{ Гц}$. Такий результат однозначно вказує на те, що використання фронтального плуга без опорного колеса не призводить до розширення спектра коливань траєкторії борозни попереднього проходу орного машинно-тракторного агрегату.

Висновки

1. При застосуванні фронтального плуга без опорного колеса спектр коливань кута повороту керованих коліс трактора є вужчим за спектр коливань цього ж параметра для агрегату з фронтальним плугом, обладнаним опорним колесом, що є фактом бажаним.

2. Аналіз експериментальних даних показує, що спектр коливань курсового кута трактора вужчий, ніж спектр коливань кута повороту його керованих коліс. Такий результат, притаманний обома варіантам орного машинно-тракторного агрегату, є цілком логічним з огляду на більшу інерційність корпусу енергетичного засобу порівняно з інертністю його керованих коліс.

3. В орного машинно-тракторного агрегату за варіантом 1 максимальне значення нормованої взаємної кореляційної функції становить 0,5. У зоні максимуму цієї функції має місце позитивний кореляційний зв'язок між кутом повороту керованих коліс трактора і його курсовим кутом. Максимум кореляційної функції зміщений вправо від нульової осі (ординати) на 1,2 с. Це вказує на те, що саме на такий час запізнюється реакція трактора (зміна його курсового кута) на керувальний вплив (кут повороту керованих коліс енергетичного засобу).

4. В орного агрегату за варіантом 2, як у динамічної системи, має місце позитивний кореляційний зв'язок між входом (керувальним впливом) і виходом. Максимальне значення цього зв'язку сягає позначки 0,9. А це в 1,8 раза більше порівняно з орним агрегатом за варіантом 1. Практично це означає, що застосування фронтального плуга без опорного колеса забезпечує більш тісний кореляційний зв'язок між кутом повороту керованих коліс трактора і його курсовим кутом. Ба більше, налаштування орного МТА за варіантом 2 (тобто без опорного колеса) дає змогу зменшити запізнення реакції трактора на зміну керувального впливу до 0,5 с. Це втричі менше, ніж в орного агрегату з фронтальним плугом, обладнаним таким колесом.

Список використаних джерел

1. Kraut-Cohen J., Zolti A., Shaltiel-Harpaz L. et al. Effects of tillage practices on soil microbiome and agricultural parameters. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 705. P. 135791. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135791.
2. Bulgakov V., Ivanovs S., Nadykto V., Petrov G. Investigation of front plough functioning stability conditions without support wheel. *Engineering for Rural Development*, 2023. P. 562–570. doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF116.
3. Nadykto V., Golub G., Kyurchev V. et al. Determining Vertical Oscillations of Front-Plow Tractor Without Support Wheel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1. Is. 1. P. 37–47. doi.org/10.15587/1729-4061.2024.296842.



4. Zhang Sh., Xie B., Wen Ch. Et al. Intelligent ballast control system with active load-transfer for electric tractors. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 215. P. 143–155. doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.008.
5. Csatlos, C. The Frontal and Rear Ploughs Effects on 4WD Tractors, in: *The 3rd International Conference on "Computational Mechanics and Virtual Engineering"*. 2009. P. 194–199.
6. ASAE Standards S513, 2003. Agricultural wheeled tractors – Front-hitched three-point linkage. St. Joseph, Michigan: ASAE.
7. Singh N., Pandey K. Development of Visual Basic Program to Design Front Mounted Three-Point Linkage for Higher Power Tractors. *Advances Research*. 2017. Vol. 11. Is. 2. P. 1–10. doi.org/10.9734/air/2017/35767.
8. Кувачов В. П., Мітков В. Б. Обґрунтування критеріїв оптимальності сумісного маршрутизованого руху технологічного комплексу МТА. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2012. №. 2, Т. 5. С. 8–14.
9. Schumacker R. & Tomek S. Understanding Statistics Using R. Springer, New York, NY, 2013. 297 p. doi: 10.1007/978-1-4614-6227-9_11.
10. Witte R.S., Witte J.S. Statistics. *John Wiley & Sons*. 2017. 320 p.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2025 р.

V. Nadykto, G. Petrov

Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

CONTROLLABILITY STUDY OF THE PLOUGH MOTION WITH FRONT PLOUGH WITHOUT SUPPORT WHEEL

Summary

Using plough units characterizes modern agricultural production according to the “push-pull” scheme. Its feature is the use of a front plough. Usually, this plough tool is used with a support wheel. This study considers analyzing the stability of the plough movement unit with a front plough with a support wheel (option 1) compared to the option without it (option 2). The studies have established that when using the unit according to option 2, the oscillations spectrum of the tractor-steered wheels’ rotation angle is narrower than that of the same parameter for the unit with a front plough equipped with a support wheel. The oscillation spectrum of the tractor course angle is narrower than the oscillation spectrum of the angle of rotation of its steered wheels. This result is inherent in both options of the plough machine-tractor unit. In the plough unit, according to option 2, as in the dynamic system, there is a positive correlation between the input (control influence) and the output. The maximum value of this relationship reaches 0.9. And this is 1.8 times more than in the plough unit according to option 1. In practice, this means that using a front plow without a support wheel provides a closer correlation between the rotation angle of the tractor’s steered wheels and its course angle.

Keywords: tractor, steered wheels, course angle, spectral density, cross-correlation function.